

# ELABORACION DE UN MODELO DE CRECIMIENTO DINAMICO PARA RODALES REGULARES DE *Pinus pinaster* Ait EN GALICIA

**J.G. ALVAREZ GONZALEZ  
R. RODRIGUEZ SOALLEIRO**

Escuela Politécnica Superior de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela  
27002 Lugo. España

**G. VEGA ALONSO**

Centro de Investigaciones Forestales de Lourizán. Apdo. 127.  
36080 Pontevedra. España

## RESUMEN

Se presenta un modelo de crecimiento obtenido mediante una metodología dinámica, basada en la predicción del incremento anual del área basimétrica, que se ha obtenido a partir de datos de parcelas permanentes y temporales en rodales regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Se plantea como índice para definir el tipo de clara una relación de extracción del área basimétrica, mediante la cual se obtiene el cambio instantáneo del rodal por efecto de esas cortas. Se discuten las ventajas de este tipo de modelos y su posible uso práctico en la gestión forestal.

**PALABRAS CLAVE:** *Pinus pinaster*  
Modelo dinámico  
Incremento en área basimétrica

## INTRODUCCION

La mayoría de los estudios de crecimiento y producción (tablas de producción) realizados en España corresponde a modelos a nivel de rodal, en los que se consideran ecuaciones que dan la evolución en el tiempo de las principales variables dasométricas de masa.

Dichos modelos son de naturaleza estática, en el sentido de que no predicen, directamente, tasas de cambio de ninguna de las variables de masa. Las relaciones obtenidas se refieren siempre a una determinada evolución de la densidad, que en el caso de las tablas de producción de selvicultura media es fija mientras que en las tablas de selvicultura de referencia se proponen alternativas diferentes (Madrigal, 1991).

Por el contrario, los modelos de carácter dinámico (tablas de selvicultura variable) predicen fundamentalmente tasas de cambio, es decir, crecimientos de alguna

---

Recibido: 17-12-98

Aceptado para su publicación: 3-5-99

variable dasométrica que, normalmente, es el diámetro medio cuadrático, el área basimétrica o el volumen. A partir de estas ecuaciones se obtiene, bien por integración o por aplicación sucesiva de incrementos, la evolución del rodal en el tiempo (Alder, 1980).

El fundamento de este último tipo de modelos debe buscarse en la teoría matemática de sistemas, que establece los siguientes pilares básicos (García, 1988):

- Una descripción del estado del rodal en un momento dado, para lo cual se emplearán variables dasométricas que lo definan perfectamente y a través de las cuales se puedan determinar otras variables de interés. Los estados futuros del rodal quedan así marcados por su estado actual y por las actuaciones que se realicen sobre él.
- Unas funciones de transición, que definan la tasa de cambio del sistema y que dependan del estado actual. Esas funciones están representadas en el modelo por ecuaciones de incremento o en forma integrada.
- Unas funciones de control, que regulen las modificaciones provocadas en las variables de masa por cambios instantáneos de estado originados por tratamientos culturales.

Las ventajas más importantes de los modelos dinámicos son (Alder, 1980):

- Resultan más representativos de la verdadera dependencia causa-efecto entre la densidad de la masa y la producción, sobre todo porque el crecimiento se ve directamente influido por las cortas de claro o clara. Sirven, por tanto, para plantear un amplio abanico de alternativas selvícolas.
- Pueden usarse para analizar y sintetizar datos de muy diversos tipos y correspondientes a tratamientos selvícolas muy variables (sitios de ensayo de tratamientos selvícolas, parcelas temporales o parcelas permanentes).

A estas ventajas podría añadirse la facilidad para desarrollar programas informáticos basados en este tipo de modelos, lo que posibilita su uso directo por los propietarios y gestores forestales, que pueden simular tratamientos y analizar sus posibles consecuencias en términos de crecimiento.

Si bien el empleo de esta metodología es aún reciente en nuestro país, pueden citarse algunos interesantes ejemplos.

Para *Pinus radiata* en el País Vasco se ha desarrollado un modelo de simulación de rodales regulares, con estimación adicional de distribuciones diamétricas (Espinell *et al.*, 1997). Se ha seguido la metodología descrita por Páscoa (1987), analizando por separado la evolución del rodal hasta la primera clara, el efecto de la clara y la evolución entre dos claras. Para este último caso se usa una función de crecimientos del área basimétrica en forma integrada.

Una metodología similar se ha usado recientemente en el estudio de producción y efecto de las claras en *Pinus sylvestris* en los Sistemas Central e Ibérico (Río, 1998). Las ecuaciones de transición usadas en este caso permiten predecir tanto el área basimétrica como el volumen a partir de valores anteriores de esas variables, de las edades y del índice de sitio, tratándose del mismo sistema de ecuaciones empleado por Sullivan y Clutter (1972) para *Pinus taeda*. En particular, se emplea la forma integrada de la conocida ecuación de incrementos:

$$IG = \frac{G}{t} (a + b \cdot S - \ln G) \quad [1]$$

Donde  $I_G$  es el incremento anual del área basimétrica,  $G$  el área basimétrica a la edad  $t$ ,  $S$  el índice de sitio y  $a$  y  $b$  dos parámetros a ajustar.

En el Centro de Investigaciones Forestales de Lourizán se ha desarrollado un modelo dinámico para rodales de *Pinus pinaster* que es objeto del presente escrito

## MATERIAL Y METODOS

### Dispositivo experimental

El dispositivo total de sitios de ensayo empleado corresponde a una recopilación de cuatro grupos de parcelas, instaladas en masas regulares gallegas por diferentes grupos de investigación y en diferentes épocas, totalizando 555 inventarios.

El primer grupo de parcelas corresponde a las instaladas por el Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias (I.F.I.E.) en Pontevedra con el objetivo de elaborar tablas de selvicultura media (Echeverría y De Pedro, 1948). El segundo corresponde a las instaladas por el Centro de Investigaciones Forestales (C.I.F.) de Lourizán para el estudio de la calidad de estación y efectos de la fertilización en pino pinaster (Bará y Toval, 1983). El tercer grupo corresponde a los sitios de ensayo de clara instalados por el I.F.I.E. entre 1965 y 1972, con los que se pretendía elaborar tablas de producción en función de la densidad de la masa. El cuarto grupo corresponde a parcelas temporales instaladas en el área interior de Galicia durante 1993, en el marco del estudio de crecimiento que se presenta.

Existe una gran heterogeneidad entre las parcelas, lo que deriva de su carácter temporal o permanente, de la realización o no de claras durante el período de estudio y, sobre todo, de la diferente espesura existente, lo que es consecuencia lógica de la evolución temporal de la selvicultura aplicada a esta especie. La Tabla 1 muestra los valores medios y extremos de las principales variables de masa de cada uno de los cuatro grupos de parcelas.

A partir de los datos de inventario obtenidos en la parcelas, se han calculado los parámetros dasométricos de masa siguientes: densidad, área basimétrica, área basimétrica extraída, altura media, altura dominante, edad y volumen total. Se ha seguido para ello la metodología expuesta por Madriga *et al.* (1992), especialmente en lo referente a la construcción de tarifas de cubicación de dos entradas y tablas de una entrada para cada parcela. Los datos elaborados se han usado para el ajuste de las relaciones fundamentales.

### Ambito de aplicación

Se ha considerado la realización de dos modelos de crecimiento: uno relativo a las masas de la Galicia costera y otro para las del interior. La división entre las dos zonas es coincidente con las áreas de mejora de la especie marcadas por el Plan de Mejora Genética Forestal de Galicia (Vega *et al.*, 1993), que a su vez se fundamentó en estudios climáticos previos (Toval y Vega, 1982).

**TABLA 1**  
**VALORES MEDIO Y EXTREMOS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES**  
**DE MASA DE LAS PARCELAS EMPLEADAS EN EL AJUSTE DEL MODELO**  
*Mean and limit values of the principal stand variables describing sampling plots*

Grupo de parcelas (n.º inventarios)	Valor	Edad (años)	Densidad (pies/ha)	Area basimétrica (m <sup>2</sup> /ha)	Altura dominante (m)	Indice de sitio*
1 (147)	Máximo	67	6.576	55,8	21,8	19,4
	Medio	17,7	2.035,1	25,7	12,8	13,7
	Mínimo	10	336	3,9	5,6	8,1
2 (119)	Máximo	50	3.237	72,44	24,58	21,9
	Medio	21,9	1.206,1	29,64	12,65	14,2
	Mínimo	8	363	1,36	4,22	7,1
3 (267)	Máximo	27	4.642	64,36	14,42	18,8
	Medio	18,7	1.776,7	29,98	10,65	13,4
	Mínimo	11	701	12,07	6	7,5
4 (22)	Máximo	48	1.225	54,86	24,27	15,6
	Medio	34,5	615	38,14	19	12,5
	Mínimo	12	275	20,71	13,5	7,6

\* Definido como la altura dominante que alcanza la masa a la edad de referencia de 20 años.

Resulta evidente la diferente pauta de crecimiento de la especie en cada zona, derivada tanto de condiciones climáticas como del diferente origen del material empleado en la repoblación forestal. Así, para muchos montes del interior se aprecia un mayor crecimiento en diámetro de los pies, mayores porcentajes de corteza y desarrollos mediocres en altura, que no encajan en la evolución teórica de los rodales costeros (Pita y Moreno, 1973).

### Construcción del modelo

Para la construcción del modelo dinámico se considera el estado del rodal en un momento determinado definido por tres variables de estado: la densidad,  $N$ ; la altura dominante,  $H_0$ ; y el área basimétrica,  $G$ .

La evolución de la primera variable de estado no se somete a restricción en el modelo, de modo que puede plantearse cualquier evolución posible, eligiendo marcos de plantación y regímenes de clareo o clara siempre que esa evolución estuviese representada en las parcelas empleadas para ajustar el modelo. El ámbito total de densidades manejado se presenta en la Tabla 2.

En las parcelas permanentes empleadas, muchas de ellas con niveles muy elevados de densidad, se comprobó que la mortalidad de árboles entre inventarios era muy reducida e incluso nula, por lo que no fue posible ajustar una ecuación de reducción de densidad por mortalidad natural.

**TABLA 2**  
**INTERVALOS DE DENSIDAD EN PIES/HA PRESENTES EN**  
**LAS PARCELAS Y UTILIZADAS EN EL DESARROLLO DEL MODELO**  
*Density values (stems/ha) describing sampling plots*

Edad	10	15	20	25	30	40
<b>Zona Costera</b>	1.200-5.500	700-3.600	500-2.400	500-1.900	400-1.600	400-1.200
<b>Zona Interior</b>	1.600-5.500	1.100-3.700	800-2.200	500-2.200	400-1.7000	400-1.200

La relación altura dominante-edad se ha obtenido mediante el ajuste de un modelo de evolución de dicha altura en el tiempo, que constituye la primera relación fundamental.

Para el ajuste de dicha relación se emplearon las ecuaciones de Hossfeld, Schumacher, Richards y Biging y Wensel (1985), derivada, esta última, del modelo general de Richards en el que el valor de la asíntota se parametriza en función del índice de sitio, definido, en este caso, como la altura dominante alcanzada por la masa a la edad de 20 años.

$$\text{Hossfeld} \quad H_0 = \frac{t^2}{a + b \cdot t + c \cdot t^2} \quad [2a]$$

$$\text{Schumacher} \quad H_0 = e^{a + b \cdot \left(\frac{1}{t}\right)^c} \quad [2b]$$

$$\text{Richards} \quad H_0 = a \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{b \cdot t}}\right)^c \quad [2c]$$

$$\text{Biging y Wensel} \quad H_0 = a \cdot S^b \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{c \cdot t}}\right)^d \quad [2d]$$

Siendo  $H_0$  la altura dominante (dm),  $S$  el índice de sitio (dm),  $t$  la edad (años) y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  parámetros a determinar en el ajuste.

Para modelizar la evolución del área basimétrica fueron necesarias tres ecuaciones:

- En las primeras edades, al no contar con datos de incremento anual de área basimétrica, se ajustó una ecuación que proporcionaba su valor en función de la densidad y de la altura media o dominante. Constituye la segunda relación fundamental y es similar a la que se emplea en modelos estáticos. Se han empleado cuatro modelos diferentes:

$$d_g = a + b \cdot \frac{100}{N} + c \cdot \bar{H} \quad [3a]$$

$$d_g = a + b \cdot \frac{100}{N^{0,5}} + c \cdot \bar{H} \quad [3b]$$

$$d_g = a + b \cdot \frac{100}{N^{0,5}} + c \cdot \bar{H}_0 \quad [3c]$$

$$d_g = a + b \cdot \frac{100}{N^k} + c \cdot H_0 \quad [3d]$$

- Siendo  $d_g$  el diámetro medio cuadrático (cm),  $N$  la densidad en pies/ha,  $\bar{H}$  la altura media (m),  $H_0$  la altura dominante (m), con  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $k$  parámetros a estimar.

A partir de los 10 años de edad se emplea la función de transición principal, que predice incrementos anuales del área basimétrica ( $I_G$ ) en función del valor de partida de dicha variable ( $G$ ) y de la edad del rodal ( $t$ ). Esta relación permite proyectar hacia el futuro el estado del rodal y constituye la tercera relación fundamental del modelo.

$$I_G = f(G, t) \quad [4]$$

- La modificación instantánea en el estado del rodal, derivada de la realización de un clareo o clara, se traduce en una reducción del área basimétrica que puede obtenerse mediante la cuarta relación fundamental o función de control. El uso de esta ecuación requiere una selección previa de la densidad de los pies extraídos y del tipo de clareo o clara a realizar.

La quinta relación fundamental es una tarifa de cubicación de masa que actúa como función de salida, al proporcionar una variable adicional, el volumen total, en función de variables de estado, en este caso el área basimétrica y la altura media o dominante. En el ajuste de esta quinta relación fundamental se probaron tres modelos:

$$V = a + b \cdot G \cdot H_0 \quad [5a]$$

$$V = a + b \cdot G \cdot \bar{H} \quad [5b]$$

$$V = a + b \cdot G^c \cdot H_0^d \quad [5c]$$

Donde  $V$  es el volumen maderable con corteza ( $m^3/ha$ ),  $G$  es el área basimétrica ( $m^2/ha$ ),  $\bar{H}$  la altura media (m),  $H_0$  la altura dominante (m), con  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  parámetros a estimar.

Las principales diferencias con respecto al sistema de relaciones fundamentales, empleado tan frecuentemente en tablas de producción españolas, consisten en la ausencia de una única ecuación de evolución de la densidad y en la consideración de las funciones de transición y de control.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Ajuste de las relaciones fundamentales comunes con los modelos estáticos

En el ajuste del modelo de evolución altura dominante-edad, la ecuación de Biging y Wensel (1985) fue la que presentó los mejores resultados. El proceso de ajuste se expone en Rodríguez *et al.* (1993).

El principal inconveniente de esta relación es que no cumple la condición de que a cada curva, a la edad de 20 años, le corresponda como altura el índice de sitio. Por ello se procedió a condicionar el modelo mediante un cambio en el valor del índice de sitio incluido en el modelo, de modo que las ecuaciones finalmente obtenidas son:

$$\text{Costa} \quad H_0 = 2,2878 \cdot S^{0,9433} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{0,2594-t}}\right)^{1,4061} \quad \text{con} \quad S = 0,7612 \cdot S_R^{1,0601}$$

$$\text{Interior} \quad H_0 = 2,5385 \cdot S^{0,9656} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{0,0419-t}}\right)^{1,3762} \quad \text{con} \quad S = 0,8537 \cdot S_R^{1,0356}$$

Siendo  $H_0$  la altura dominante (dm),  $S$  el índice de calidad modificado (dm),  $S_R$  el índice de calidad real (dm) y  $t$  la edad (años). En la Tabla 3 se muestran los resultados de los ajustes para cada zona.

**TABLA 3**  
**RESULTADOS DEL AJUSTE DE LA ECUACION (2d)**  
**PARA CADA AMBITO DE APLICACION**  
*Results of the fitting of equation (2d) for the coastal and interior zone*

	Estimación de parámetros						R <sup>2</sup>	MSE	Tamaño de muestra
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a<sub>1</sub></i>	<i>a<sub>2</sub></i>			
<b>Costa</b>	2,2878	0,9433	0,2549	1,4061	0,7612	1,0601	0,9552	0,0186	193
<b>Interior</b>	2,5385	0,9656	0,0419	1,3762	0,8537	1,0356	0,9517	0,0188	185

En el ajuste de la segunda relación fundamental, los mejores resultados, en términos del valor del coeficiente  $R^2$  y del análisis de residuos, se obtuvieron con la ecuación [3d] empleada por Madrigal *et al.* (1992) en *Fagus sylvatica*. Los ajustes para cada una de las zonas de estudio se muestran en la Tabla 4 y las ecuaciones definitivas son las siguientes:

$$\text{Costa} \quad d_g = -1,9018 + 14,838 \cdot \frac{100}{N^{0,75}} + 0,8806 \cdot H_0$$

$$\text{Interior} \quad d_g = -14,3258 + 0,7606 \cdot \frac{100}{N^{0,2}} + 1,1432 \cdot H_0$$

Donde  $d_g$  es el diámetro medio cuadrático (cm),  $N$  la densidad en pies/ha y  $H_0$  la altura dominante (m).

**TABLA 4**  
**RESULTADOS DEL AJUSTE DE LA ECUACION [3d]**  
**PARA CADA AMBITO DE APLICACION**

*Results of the fitting of equation [3d] for the coastal and interior zone*

	Estimación de parámetros				$R^2$	MSE	Tamaño de muestra
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>k</i>			
<b>Costa</b>	-1,9018	14,838	0,8806	0,75	0,9811	3,3047	259
<b>Interior</b>	-14,3258	0,7606	1,1432	0,2	0,8669	5,3032	272

Los mejores resultados al ajustar la tarifa de masas (quinta relación fundamental) se obtuvieron con la ecuación [5a], aunque prescindiendo del término independiente al no poder rechazarse la hipótesis nula de que su valor es igual a cero. La Tabla 5 muestra los resultados de los ajustes de dicha ecuación para las zonas costera e interior. Las relaciones definitivas son las siguientes:

$$\text{Costa} \quad V = 0,4215 \cdot G \cdot H_0$$

$$\text{Interior} \quad V = 0,4348 \cdot G \cdot H_0$$

Siendo  $V$  el volumen maderable con corteza ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ),  $G$  el área basimétrica ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) y  $H_0$  la altura dominante (m).



**TABLA 5**

**RESULTADOS DEL AJUSTE DE LA ECUACION [5a] SIN TERMINO  
INDEPENDIENTE PARA CADA AMBITO DE APLICACION**

*Results of the fitting of equation [5a] without intercept for the coastal and interior zone*

	Estimación parámetro b	R <sup>2</sup>	MSE	Tamaño de muestra
Costa	0,4215	0,9967	10,0345	228
Interior	0,4348	0,9990	6,1104	268

Los análisis de residuos de las relaciones ajustadas no mostraron, en ningún caso, tendencias anómalas que hicieran suponer un incumplimiento en las hipótesis de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia.

**Relación de extracción de área basimétrica**

La realización de cortas de mejora (clareos o claras) provoca un cambio instantáneo en el rodal, que afectará a la densidad y al área basimétrica, pudiéndose considerar que la altura dominante permanece inalterada.

Se consideró aconsejable, en este caso, la obtención de una ecuación que proporcionase el área basimétrica extraída en la clara partiendo de la elección previa del peso de ésta (evaluado mediante la proporción de pies extraídos) y del tipo de clara a realizar. Con el mismo objetivo, Alder (1980) propone la "proporción de clara" como relación para definir el tipo de clara, que tiene la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{N' \cdot G}{N \cdot G'} \quad [6]$$

Donde  $P_c$  es la proporción de clara,  $N'$  la densidad después de clara,  $N$  la densidad antes de clara y  $G$  y  $G'$  los valores de área basimétrica antes y después de clara respectivamente.

El propio Alder (1980) establece el rango de variación de la proporción de clara de la siguiente forma:

Claros por lo bajo: 0,6-0,8

Claros mixtas: 0,8-1,0

Claros por lo alto: 1,0-1,3

Sin embargo, la aplicación de este índice a las parcelas permanentes de ensayo de claras en pino pinaster no produjo resultados satisfactorios, ya que en la inmensa mayoría de

los casos los valores de  $P_c$  se concentraban en un intervalo muy reducido y correspondiente a claras mixtas (0,8-0,9), lo que no se corresponde con la realidad. Este efecto se debe a que en claras de peso débil, muy representadas en los datos de partida, el valor de  $P_c$  tiende a hacerse excesivamente alto.

Otro índice muy empleado para describir el tipo de clara es la razón de clara  $R_c$  (Carvalho, 1985), definida como el cociente entre el diámetro medio cuadrático de los pies extraídos ( $d_{g\ ext}$ ) y el diámetro medio cuadrático antes de clara ( $d_g$ ). Se ha probado su uso y los valores que adopta oscilan entre 0,6 y 1,0 para las claras manejadas en las parcelas utilizadas.

$$R_c = \frac{d_{g\ ext}}{d_g} \quad [7]$$

Sin embargo, se ha encontrado que la relación entre la proporción de área basimétrica extraída ( $G_e/G$ ) y la proporción de pies extraídos ( $N_e/N$ ) constituye un índice que puede usarse con mejores resultados, puesto que su rango de variación es mayor (de 0,4 a 1,0), lo que facilita la caracterización de los tipos de clara. Este índice, al que se le podría denominar "relación de extracción de área basimétrica" ( $R_e$ ), se ha empleado de forma inversa con buenos resultados (Gadow y Hui, 1997):

$$R_e = \frac{G_e/G}{N_e/N} \quad [8]$$

El índice toma valores que oscilan entre 0,35 y 0,95. Los valores situados entre 0,35 y 0,60 son representativos de claras por lo bajo. En las claras mixtas oscila entre 0,60 y 0,90; siendo superior a 0,90 en las claras por lo alto, muy poco representadas en los datos y que carecen de sentido selvícola en esta especie. En el caso de clareos o claras sistemáticas, el valor de  $R_e$  es igual a 1.

La consideración de distintos valores de  $R_e$  permite simular cualquier tipo de claras. Si además se determina la densidad a extraer, podrá calcularse con la ecuación anterior el área basimétrica extraída, estableciendo la modificación instantánea en el estado del rodal.

### Relación de incremento del área basimétrica

Una función de transición corrientemente empleada en los modelos dinámicos es la ecuación de incremento anual del área basimétrica,  $I_G$ . Si se representan los valores de  $I_G$  en función de la altura dominante para un determinado nivel de área basimétrica, se obtiene una curva que crece rápidamente hasta alcanzar un máximo, que se sitúa normalmente a edades tan pequeñas que no suelen estar reflejadas en las parcelas de muestreo.

A partir del máximo se tiene una zona de decrecimiento de  $I_G$ , con diferencias importantes según los niveles de espesura. Esta es la parte de la curva normalmente presente en los datos y puede ajustarse con distintos modelos matemáticos (Kiviste, 1988). Para las edades previas al máximo puede ajustarse una ecuación de evolución de  $G$  o  $d_g$  en el tiempo, como las usadas normalmente en los modelos estáticos.

Esta separación en dos intervalos de edad resulta aceptable si consideramos que la edad de realización del primer clareo o clara es normalmente superior a aquella en la que se produce el máximo de  $I_G$  (entre siete y nueve años para el pino pinaster gallego), con lo que el intervalo de uso de la forma dinámica del modelo coincide plenamente con el de realización de cortas de mejora.

El ajuste de la ecuación de incremento requiere el uso de datos de crecimiento, y por tanto procedentes de parcelas con más de un inventario. Para pino pinaster gallego se contaba con 260 datos de crecimiento del área basimétrica, correspondientes a períodos entre inventarios de tres a seis años.

Para reducir el efecto de fluctuaciones climáticas y de errores instrumentales se obtuvieron los incrementos anuales a partir de los datos de incrementos periódicos (Alder, 1980).

El ajuste de esta ecuación se realizó por mínimos cuadrados "stepwise" empleando el modelo de Bertalanffy e incluyendo como variables dependientes, además del área basimétrica inicial, la edad y el índice de calidad. Este último fue excluido en los ajustes al no mejorar significativamente el valor del coeficiente de determinación, por lo que las expresiones de las ecuaciones definitivas son las siguientes:

$$\text{Costa} \quad I_G = 27,7833 \cdot G^{0,3367} \cdot t^{-1,3407}$$

$$\text{Interior} \quad I_G = 16,8123 \cdot G^{0,4654} \cdot t^{-1,2493}$$

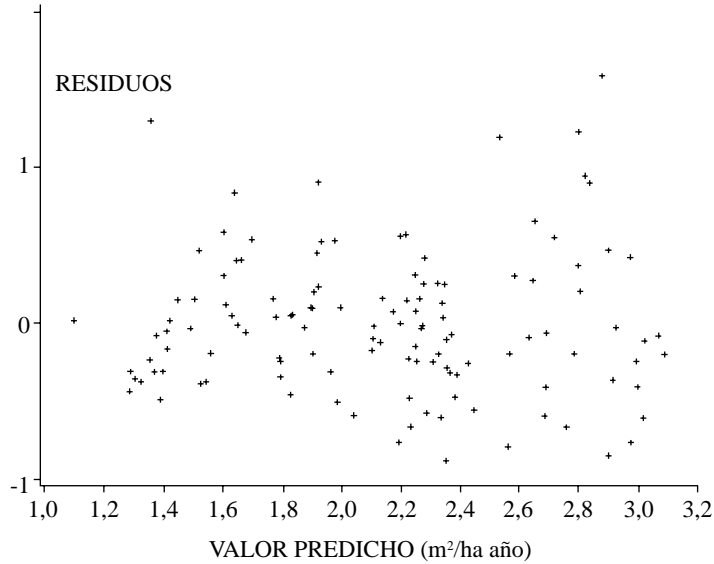
Siendo  $I_G$  el incremento anual del área basimétrica ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ),  $G$  el área basimétrica inicial ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) y  $t$  la edad inicial (años). En la Tabla 6 se presenta el resultado del ajuste para las zonas costera e interior. Los análisis de residuos (Figs. 1 y 2) no mostraron tendencias anómalas indicativas de incumplimientos de las hipótesis de partida.

**TABLA 6**

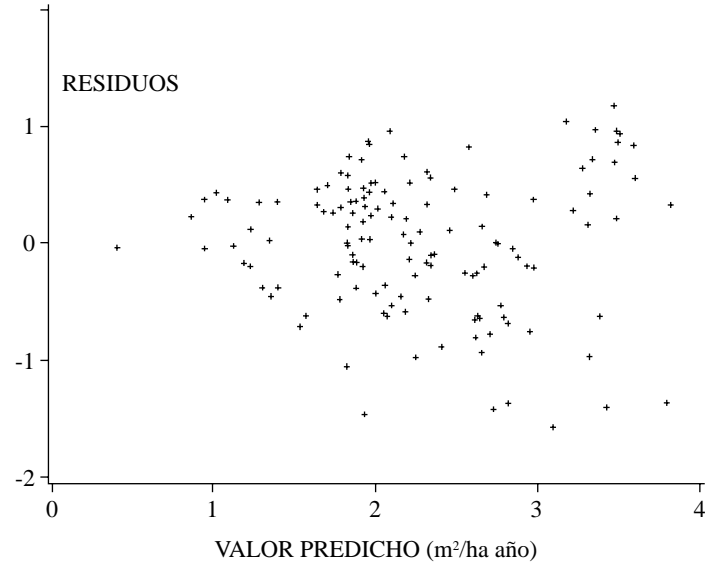
**RESULTADOS DEL AJUSTE DE LA ECUACION  
 $I_G - f(G, t)$  PARA CADA AMBITO DE APLICACION**

*Results of the fitting of equation  $I_G = f(G, t)$  for the coastal and interior zone*

	Estimación de parámetros			$R^2$	MSE	Tamaño de muestra
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>			
<b>Costa</b>	27,7833	0,3367	-1,3407	0,5749	0,3494	136
<b>Interior</b>	16,8123	0,4654	-1,2493	0,6042	0,2123	124



**Fig. 1.**—Distribución de residuos frente a valores predichos obtenidos del ajuste de la ecuación de incremento del área basimétrica en la zona interior  
*Residuals plotted over predicted values obtained from the fitting of equation  $I_G = f(G, t)$  for the interior zone*



**Fig. 2.**—Distribución de residuos frente a valores predichos obtenidos del ajuste de la ecuación de incremento del área basimétrica en la zona costera  
*Residuals plotted over predicted values obtained from the fitting of equation  $I_G = f(G, t)$  for the coastal zone*

Los valores del coeficiente de determinación múltiple,  $R^2$ , resultaron de 0,60 en zona costera ( $MSE = 0,3494$ ) y 0,55 en zona interior ( $MSE = 0,2123$ ). Si bien son valores bajos, resulta difícil obtener mejores resultados en estas ecuaciones, especialmente si no se parte de una gran cantidad de datos de parcelas permanentes.

En las Figuras 3 y 4 se representan las curvas obtenidas del incremento de área basimétrica, considerando seis niveles de área basimétrica inicial: 5, 15, 25, 35, 45 y 55  $m^2/ha$ .

### Validación del modelo y desarrollos futuros

Para proceder a la autovalidación del modelo se han comparado los valores del volumen total observados en el último inventario de las parcelas permanentes con el volumen predicho por el modelo, después de considerar el estado de la parcela antes de clara en el primer inventario y simular con el modelo la realización de las claras que en cada inventario se practicaron.

Se han calculado los errores relativos y absolutos correspondientes a los intervalos de tiempo entre el primer y el último inventario de cada parcela. Para determinar los errores relativos anuales se han considerado estos como acumulativos.

En la zona costera el valor medio del error relativo anual es de 1,69 %, lo que indica una pequeña subestimación de las existencias futuras; mientras que, en la zona interior ese valor es de 0,64 %. Se ha analizado el comportamiento de los errores frente a la edad, el índice de calidad y el peso de clara, obteniéndose distribuciones homogéneas sin comportamientos sistemáticos.

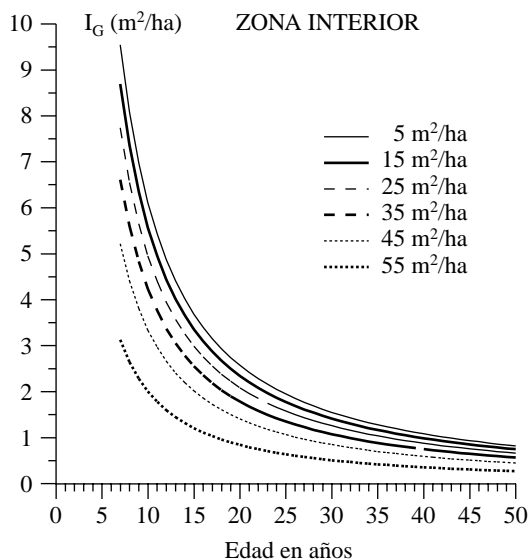
El ámbito de aplicación del modelo viene dado por los datos presentes en las parcelas de inventario. Respecto a la edad, el límite de empleo serían los 40 años en zona costera y los 50 en zona interior. Respecto a los valores de densidad, estos están incluidos en la Tabla 2. No están presentes en las parcelas claras de peso extremadamente fuerte (superior al 50 % del número de pies), por lo que el modelo no debería usarse para comprobar el efecto de esas intervenciones.

A partir de las ecuaciones del modelo se ha desarrollado un programa ejecutable que permite generar tablas de producción de silvicultura variable a partir de los datos suministrados por el usuario a través de un sistema de menús (Rodríguez *et al.*, 1994).

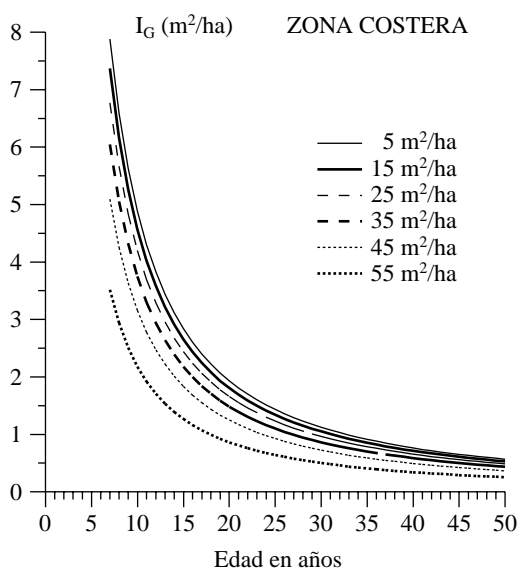
Pueden considerarse evoluciones preestablecidas de la densidad, realizando una simulación a partir del estado inicial del rodal, o bien elegir una opción de "silvicultura a la carta", en la que se fijan valores mínimos para las extracciones de clara y para las dimensiones de los árboles en corta final. El modelo es, sin embargo, susceptible de muy diversas implementaciones informáticas.

Las posibilidades de uso práctico del modelo se derivan de su flexibilidad, pudiendo plantearse diferentes intervenciones selvícolas, con claros y claras de diferente tipo y peso, distintas densidades iniciales y turnos de corta final, comprobando la evolución del rodal y los productos obtenidos, lo que permite realizar una evaluación económica de distintas alternativas selvícolas en montes regulares.

El modelo se ha aplicado recientemente, con buenos resultados, al proyecto de ordenación del Parque Natural del Monte Aloia (Pontevedra), lo que ha permitido evaluar las calidades de estación de los rodales existentes y realizar los cálculos de existencias y posibilidades de corta.



**Fig. 3.**—Curvas de crecimiento anual del área basimétrica en  $\text{m}^2/\text{ha}$  para la zona interior obtenidas a partir de unos valores iniciales de dicha variable de 5, 15, 25, 35, 45 y 55  $\text{m}^2/\text{ha}$   
*Annual increment of basal area ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) for interior zone obtained from initial values of 5, 15, 25, 35, 45 y 55  $\text{m}^2/\text{ha}$*



**Fig. 4.**—Curvas de crecimiento anual del área basimétrica en  $\text{m}^2/\text{ha}$  para la zona costera obtenidas a partir de unos valores iniciales de dicha variable de 5, 15, 25, 35, 45 y 55  $\text{m}^2/\text{ha}$   
*Annual increment of basal area ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) for coastal zone obtained from initial values of 5, 15, 25, 35, 45 y 55  $\text{m}^2/\text{ha}$*

Algunos desarrollos recientes del modelo consisten en la obtención de "funciones de salida" para determinar las distribuciones diamétricas a partir de las variables de estado (Alvarez, 1997), así como los trabajos que actualmente se llevan a cabo en el C.I.F. de Lourizán para enlazar este modelo con nuevos modelos de árbol individual, lo que determinaría una descripción más detallada del estado del rodal y la posibilidad de aplicación a rodales semirregulares.

## SUMMARY

### Development of a dynamic growth model of even-aged *Pinus pinaster* Ait. Stands in Galicia

A growth model obtained from a dynamic methodology based on the prediction of the annual basal area increment is presented. The sample data come from permanent and temporary plots installed in even-aged stands of *Pinus pinaster* Ait. in Galicia (Northwestern Spain). A basal area removed-total basal area ratio is used to define the type of thinning and this ratio allows to obtain the instantaneous change of the stand due to the treatment. The advantages of this type of models and their practical use in the forest management is discussed.

**KEY WORDS:** *Pinus pinaster*  
Dynamic model  
Basal area growth

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALDER D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios F.A.O. Montes 22/2. Roma. 198 pp.
- ALVAREZ J.G., 1997. Estudio de distribuciones diamétricas en masas regulares de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E. T. S. de Ingenieros de Montes. 270 pp.
- BARA S., TOVAL G., 1983. Calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales 24. Madrid. 166 pp.
- BIGING G., WENSEL L.C., 1985. Site index equations for young-growth mixed conifers of northern California. N. California Forest Yield Coop. Research Note 8. Dept. of For. and Res. Mst. University California. Berkeley.
- CARVALHO A.M.M., 1985. Teoría da produção florestal. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa. 2ª Ed. 531 pp.
- ECHEVERRIA I., DE PEDRO S., 1948. El *Pinus pinaster* en Pontevedra su productividad normal y aplicación a la celulosa industrial. Boletín IFIE 38. Madrid. 147 pp.
- ESPINEL S., CANTERO A., SAENZ D., 1997. Un modelo de simulación para rodales de *Pinus radiata* D. Don en el País Vasco. IRATI 97. I Congreso Forestal Hispano Luso. Mesa 3, 201-206.
- GADOW K.v., HUI G., 1997. Modelling stand development. Manuscrito interno. E.P.S. de Lugo. Universidad de Santiago. 213 pp.
- GARCIA O., 1988. Growth modelling- a (re)view. New Zealand Forestry, 33(3),14-17.
- KIVISTE A.K., 1988. Mathematical functions of forest growth. Growth 29, 233-238.
- MADRIGAL A., 1991. Tablas de producción. Seminario sobre inventario y ordenación de montes. Valsáin, Segovia. Vol II, 32-70.
- MADRIGAL A., PUERTAS F., MARTINEZ MILLAN J., 1992. Tablas de producción para *Fagus sylvatica* L. en Navarra. Gobierno de Navarra. Dpto. de Agricultura, ganadería y montes. Serie Agraria nº 3. Pamplona. 122 pp.
- PASCOA M.F., 1987. Estrutura, crescimento e produção em povoamentos de pinheiro bravo. Um modelo de simulação. Tesis Doctoral. Universidad Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. 241 pp.
- PITA P.A., MORENO M., 1973. Introducción al estudio de las claras en su incidencia sobre la producción. Montes nº 171, 31-58.

- RIO M. del, 1998. Régimen de claras y modelo de producción para *Pinus sylvestris* L. en los sistemas Central e Ibérico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E. T. S. de Ingenieros de Montes.
- RODRIGUEZ R., ALVAREZ J.G., VEGA G., RUIZ ZORRILLA P., 1993. Revisión de las curvas de calidad de estación de *Pinus pinaster* Ait. en Galicia. LOURIZAN 93. I Congreso Forestal Español. Tomo II, 587-592.
- RODRIGUEZ R., ALVAREZ J.G., VEGA G., 1994. Piñeiro do país. Modelo dinámico de crecemento de masas regulares de *Pinus pinaster* Aiton en Galicia. Guía para o usuario do programa PINASTER. Xunta de Galicia. Manuais técnicos nº 8. 40 pp.
- SULLIVAN A.D., CLUTTER J.L., 1972. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. Forest Science 18 (1), 76-86.
- TOVAL G., VEGA G., 1982. Metodología para la cuantificación del clima, primera aproximación de su aplicación en Galicia. Actas de la Reunión Técnica Principios de Introducción de Especies. Lourizán, 4-8 de Octubre. 91 pp.
- VEGA P., VEGA G., GONZALEZ M., RODRIGUEZ A., 1993. Mejora del *Pinus pinaster* Ait en Galicia. Ponencias y comunicaciones. I Congreso Forestal Español. Tomo II, 129-134.